

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.02.030

聚醚醚酮复合材料改性研究进展

刘俊聪,刘爱云,李树虎,齐志望,李军艳,李萍,石磊

(山东非金属材料研究所,济南 250031)

摘要:总结了聚醚醚酮(PEEK)及其复合材料的力学性能、导电性能、耐摩擦性能、耐高温性能及其它性能的改进方法。着重评述了碳纳米材料、纤维、晶须等填料对 PEEK 复合材料性能的研究,介绍了近年来改性 PEEK 复合材料的研究进展,并在一定程度上总结了发展态势和规律。最后展望了 PEEK 复合材料未来的发展趋势。指出碳纳米材料、纤维、多种填料共同改性 PEEK 树脂基体时性能更优。多种因素协同作用下 PEEK 复合材料性能改进机理的研究仍需加强。

关键词:聚醚醚酮;改性;复合材料;性能;进展

中图分类号:TQ326.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2022)02-0169-06

Research Progress on Modification of PEEK Composite

Liu Juncong, Liu Aiyun, Li Shuhu, Qi Zhiwang, Li Junyan, Li Ping, Shi Lei

(Shandong Non-metallic Materials Institute, Jinan 250031, China)

Abstract : The improvement schemes of the mechanical properties, electrical conductivity, friction resistance, high temperature resistance and other properties of polyetheretherketone (PEEK) and its composites were summarized. The properties of PEEK composites filled with carbon nano-materials, fibers and whiskers were reviewed, and the research progress of modified PEEK composites in recent years was introduced. The development situation and the law were summarized to some certain degree. In the end, the development direction and trend of PEEK composites were prospected. It was pointed out that the performance of PEEK resin matrix was better when carbon nanomaterials, fibers and various fillers were co-modified. The research on the performance improvement mechanism of PEEK composites under the synergistic effect of various factors still need to be strengthened.

Keywords : polyetheretherketone ; modification ; composite ; property ; progress

聚醚醚酮(PEEK)作为一种半结晶型的高性能/特种功能工程塑料,从化学结构上来看,隶属于聚芳醚酮族,其化学结构规整有序,具有耐高温、耐腐蚀、抗氧化等诸多优异性能,适合作为高性能复合材料的基体树脂。另外,其强度与刚度优异、耐热性能良好、自润滑性能突出、抗阻燃、物理结构稳定性及具有高绝缘性,可广泛应用于兵器、航天、航空、汽车制造等众多领域^[1-5]。与其他耐高温塑料相比,PEEK是目前特种工程塑料中耐热等级最高、综合性能最好的品种,可在250℃下持久利用,与其它耐高温塑料如聚酰亚胺(PI)等相比,使用温度上限超出约50℃。

PEEK树脂本身具有优异的多种性能,但基于该树脂制备的各种制品或零件如PEEK塑料阀片,较传统金属阀片,表现出弹性模量小、冲击力小等缺点。其次,PEEK作为一

种热塑性树脂,可通过注塑、挤出等方法加工成型,但材料本身的高熔点和高温熔黏度使得加工较为困难。单一树脂也很难满足不同的使用要求,因此极端苛刻条件下,解决PEEK材料使用局限性成为了科研人员一直以来的研究重点。

为了使PEEK复合材料在苛刻环境下进一步满足综合应用要求,提高材料性能并扩大其应用范围,科研人员通常会采用碳纳米材料、纤维、晶须等填料以及共混、纤维复合、填充等工艺对PEEK进行改性,使其综合性能更加优异,已成为兵器、航空、航天等军事领域重要树脂基体材料。

PEEK作为热塑性工程塑料,具有优良的机械特性,仅纯树脂拉伸强度就可达到90 MPa以上。性能优异的PEEK树脂已替代铝和其他金属材料用作制造各种飞机零部件并应用于航空航天领域。PEEK具有良好的耐摩擦性能和力

通信作者:刘俊聪,高级工程师,主要研究方向为材料情报信息研究

收稿日期:2021-12-03

引用格式:刘俊聪,刘爱云,李树虎,等.聚醚醚酮复合材料改性研究进展[J].工程塑料应用,2022,50(2):169-174.

Liu Juncong, Liu Aiyun, Li Shuhu, et al. Research progress on modification of PEEK composite[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):169-174.

学性能,作为制造发动机内罩的原材料,用其制造的轴承、垫片、密封件、离合器齿环等各种零部件在汽车的传动、刹车和空调系统中被广泛采用。

许多科研团队将理论强度和弹性模量较高的碳纳米管和石墨烯、增强体碳纤维(CF)等作为填料加入 PEEK 树脂基体中,用以提高 PEEK 复合材料的力学、导电、耐摩擦、耐高温及其他性能。

1 力学性能改性

1.1 纳米材料改性

多壁碳纳米管(MWCNTs)材料中碳原子之间的键合关系是由 sp^2 杂化形成的 $C=C$ 和 $C-C$ 共价键构成的,其具有较好的轴向强度、韧性及弹性模量。石墨烯(GR)或碳纳米管(CNTs)由于其自身的形状、高表面积比或范德华力和 $\pi-\pi$ 键的相互作用,使其作为单一填料时很容易发生缠绕或团聚,但通过熔融共混、原位聚合等工艺方式,可优化提升树脂性能,因此在树脂改性应用方面较为广泛^[6-10]。

林里等^[11]制备了一种含萘聚芳醚酮(Nap-PAEK),以其作为表面修饰剂对 MWCNTs 填料进行了表面包覆。包覆后的 MWCNTs 与 PEEK 以 1:5 的比例进行物理共混得到一系列 PEEK/MWCNTs 复合材料。研究表明,Nap-PAEK 较好地改善了 MWCNTs 在溶液和树脂基体中的分散性,修饰后的 MWCNTs 在 N-甲基吡咯烷酮溶液中的分散量较修饰前提升了 10 倍。而采用修饰后的 MWCNTs 制备的 PEEK 复合材料,在 MWCNTs 添加量仅为 2%(质量分数)时,与纯 PEEK 树脂相比,PEEK 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了 14.5% 和 116.7%,基本实现了 PEEK 复合材料的增强增韧、耐热性能也较大提升。

朱姝等^[12]将一定配比的氧化石墨烯(GO)、PEEK 与上浆剂混合均匀后、涂覆于活化 CF 表面,制备纤维-基体界面修饰的具有高剪切强度的 PEEK/CF 复合材料。分别对改性 PEEK 复合材料的微观形貌与结构、断裂行为进行表征、评价与分析。结果表明,当 GO 质量分数不超过 0.5% 时,在 PEEK 中分散良好;由于界面修饰剂的氢键作用,PEEK/CF 复合材料的弯曲强度、弯曲弹性模量和剪切强度均大幅提高,断裂形式从纤维-基体脱粘转变为基体变形及断裂,表明基体与增强体的相互作用增强。

马瑞雪^[13]引入蒙脱土(MMT)作为填料、通过熔融共混工艺方法制备得到 PEEK/CNTs/MMT 复合材料。测试结果表明,通过引入填料,PEEK 复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量均得以提高,但其断裂伸长率略有下降。240℃高温环境下 0.5% CNTs、2% MMT 改性的 PEEK 纳米复合材料,其储能模量与纯 PEEK 树脂相比提高了 48.1%。

魏嘉欣^[14]通过引入 MWCNTs,充分利用共轭结构单

体间 $\pi-\pi$ 键相互作用,将 MWCNTs 表面缠绕并包覆,然后通过原位聚合工艺方式制备 PEEK 纳米复合材料。实现了 MWCNTs 在树脂基体中进一步分散,提高了 MWCNTs 和 PEEK 两者间的界面结合力,从而提高了 PEEK 复合材料的力学性能。当添加质量含量 2% 的 MWCNTs 时,PEEK 复合材料的弯曲强度为 149.3 MPa、相比于纯树脂提高了 12%,冲击强度较纯 PEEK 提高了 30%,断裂伸长率提高了 91%。

张荣伟等^[15]研发一种 GR 改性 PEEK 复合材料,其中 PEEK 100 份、CNTs 1~5 份、CF 1~5 份、GR 5~10 份、氮化硼 1~5 份、偶联剂 0.5~3 份。通过添加一维的 CNTs 和 CF 以及二维的 GR 和氮化硼形成三维网状结构,以提升 PEEK 材料热的传导性能、摩擦磨损性能和力学性能。

通过以上文献可知,科研人员通过在 PEEK 基体树脂中加入质量分数 0.5%~2% 纳米材料,PEEK 复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量均有较大提升。

1.2 纤维增强改性

为了进一步提高 PEEK 的强度,众多科研团队将 PEEK 与高强度、高比模量的 CF 复合形成 PEEK/CF 复合材料,其拥有的耐热、耐腐蚀等多种性能优势,被认为是航空航天等领域的最高端热塑性复合材料之一。过去人们认为 PEEK/CF 的性能主要受制于界面结合强度,但实际上由于界面区很大,CF 和 PEEK 基体之间的界面相互作用、很大程度上影响着基体乃至复合材料的力学性能^[16]。

张凤等^[17]研究也表明:PEEK 与 CF 复合后,可以集二者所长,在性能上形成互补,避免 CF 受冲击载荷而发生脆断、分层损伤,同时可进一步提升 PEEK 材料在强度、刚性和耐磨性等方面的性能表现,形成综合性能更为优异的工程材料。

刘芳芳等^[18]制备了 21.7%、35.4%、43.5% 不同磺化度的磺化 PEEK(SPEEK),将其通过小型编制机,通过标准试验方法对 SPEEK 上浆前后的 CF 制备的 PEEK/CF 复合材料开展层间剪切性能研究。结果表明, SPEEK 可以有效提高 PEEK/CF 复合材料的层间剪切强度,最高可达 63.25 MPa。

王家锋等^[19]研究了无真空袋压及真空袋压两种方式下 PEEK/CF 复合材料感应焊接中厚度方向及面内的温度分布与调控对焊接件的单搭接剪切性能的影响。结果表明,在真空袋中对层合板上表面和两侧添加导热板、感应焊接 300 S,焊件的单搭接剪切强度可达 41.57 MPa。

张森等^[20]研制一种耐压性能好的 PEEK 薄壁管,包括内层、中间层和外层。中间层由 CF 布增强的改性 PEEK 制成,中间层中的 CF 布为 CF 丝束编织平纹单层布,CF 布的纬线方向与圆周方向平行,当 CF 布进入到 PEEK 熔体中并

固化后,就能形成二维增强材料,其中纬线的紧密排列能大幅度增强薄壁管的耐压能力,从而使得该薄壁管的强度能够上升至约 2000 MPa,远大于纯 PEEK 的强度。

因 PEEK 熔融黏度大、CF 丝束密集且具有化学惰性、树脂对纤维束浸润困难和界面相互作用弱阻碍了高性能热塑性复合材料广泛应用,改进界面性能是研究的重点。孙一剑等^[21]采用 1% 聚醚酰亚胺 (PEI) 和 0.5% GO 对活化后的 CF 表面进行界面处理,再通过模压成型制备 PEEK/CF 复合材料。结果表明,1% PEI 改性剂的添加有效地增强了纤维和基体两者之间的相互作用力,0.5%GO 的添加可使界面结合性能得到一定程度提升,与纯 PEEK 相比,改性 PEEK 复合材料的层间剪切强度提高了 68%,弯曲强度、弯曲弹性模量分别提高了 54%,68%。复合材料破坏形式由树脂-基体脱粘转变为基体内部断裂。

研究结果证明,将 CF 作为增强体,以一定质量比加入 PEEK 中,可较大提高复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量、弯曲强度和弯曲弹性模量以及层间剪切强度等力学性能。

1.3 树脂复合改性

采用熔融共混、溶液共混、水溶液流延成膜法、压力诱导流动成型等工艺方式制备并优化改进 PEEK 复合材料力学性能。科研人员将聚醚醚酮酮、聚醚醚酮 (PES), PEI, 聚四氟乙烯 (PTFE) 等树脂与 PEEK 复合,较大幅度地提升了复合材料的力学性能。

申维新等^[22]重点研究 PEEK/CF 织物复合材料的制备工艺方法对其性能的影响。结果表明:PES 作为第三组分制备的 PEEK/连续碳纤维 (CCF) 复合材料,填充 30% 的 CCF 时,复合材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度,相比无 PES 添加改性的 PEEK/CCF 复合材料分别提高了 13.69%, 21.70%, 36.97%。

2 导电性能改性

针对 PEEK 复合材料,目前常见的树脂基导电复合材料的制备方法是将碳纳米材料、CF 等填料和聚合物树脂基体复合。

扶肖肖等^[23]以 PEEK 为基础材料,为发挥其优异的耐疲劳性、耐磨性和自润滑性,研发一种新型高耐磨滑板复合材料。采用 PEEK 和电解铜粉 (微米级) 及少量短切 CF 等成分,通过干燥-共混-冷压-烧结-冷却的成型工艺制备了不同比例的 PEEK/Cu, PEEK/Cu/CF 复合材料,并对其摩擦学性能、电学性能、微观化学结构开展了相关研究。结果显示,当电解铜粉质量含量为 50% 时,其复合材料的摩擦系数和磨损量均最小;当电解铜粉含量达 60% 时,该材料的体积电阻率为 $6.05 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$,导电性能较好。综合耐磨性和导电性等特性,含 50%~55% 电解铜粉的 PEEK 基复合

材料可以用作受电弓滑板制作材料,也可望用作航空航天轻质、屏蔽材料。

吴同华等^[24]以 PES 为黏结剂, MWCNTs 为芯层, PEEK 薄膜为皮层,制备了具有三明治结构的 PEEK/MWCNTs 电磁屏蔽复合材料。研究结果表明,将适量的黏结剂 PES 引入到 MWCNTs 芯层中,当芯层层数增加到 3 层时,复合材料的导电率、电磁屏蔽值及比电磁屏蔽值均得以提升,是一种质量轻、厚度薄、力学性能好且电磁屏蔽性能高的复合材料。

王园园等^[25]采用低熔点铜-磷 (Cu-P)、铜-锡 (Cu-Sn) 合金与 PEEK 树脂通过真空热压烧结制得一种新型金属树脂复合材料,研究了 PEEK 质量含量对复合材料电性能及力学性能的影响,分析了材料复合界面及组织结构变化与性能变化的关系,测量并分析了材料电阻率与 PEEK 体积分数之间的关系。研究结果表明:PEEK 体积分数为 15% 时,复合材料的强度达到 285 MPa,硬度为 104.1,材料的导电性能和力学性能达到了综合最佳值。

詹茂盛等^[26]利用固体合金化方法制备了不同质量比的 PEEK/MWNTs 复合材料,对两种不同冷却条件的 PEEK/MWNTs 复合材料的导电稳定性进行了研究。结果表明:PEEK/MWNTs 复合材料的体积电阻率随时间的延长而基本稳定不变。

闫文娟等^[27]制备了不同质量比的 PEEK/MWNTs 复合材料,对比研究了缓冷和速冷模压成型复合材料的熔融吸热峰和热焓的变化、交流电性能参数。结果表明:固体合金化方法能实现 MWNTs 在 PEEK 基体中的短切与良好分散,有利于导电网络的形成;PEEK/MWNTs 复合材料的交流电性能参数随频率和 MWNTs 质量含量的变化而变化,但缓冷成型和速冷成型具有不同的临界频率和逾渗阈值 (缓冷时约为 3%,速冷时约为 2%)。

陈北明^[28]通过 PEEK/CNTs 共混悬浮液的蒸发,均匀混合了 CNTs 和 PEEK 粉末,然后将共混粉末热压制备 PEEK/CNTs 复合材料。成功地利用 CNTs 改性 PEEK 基体的导电性,并研究影响其导电性的因素。添加 5% 的 CNT 后电阻率由 $> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 降低到 $104.7 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

王戎宣^[29]制备了 PEEK/CF 复合材料,并对其电性能进行测试,结果发现,伴随着 CF 质量含量的不断增加,体积电阻表现为逐渐下降,当 CF 含量达到 15% 时,体积电阻也下降到 $850 \Omega \cdot \text{m}$,再继续增加 CF 含量,其电阻变化不大。

唐明静等^[30]通过熔融共混法制备了 PEEK/CF 复合材料,并对其电性能进行测试,结果发现,随着 CF 质量分数增加到 10%,复合材料导电性能呈现出逾渗效应,但是逾渗值较高,在经过热处理后,CF 含量较高的复合材料电阻率呈

现上升趋势,一定 CF 含量的 PEEK 复合材料表现出明显的 PTC 效应。

苏亚男等^[31]使用层间喷涂法制备了 PEEK/石墨烯 (GR)/CF 复合材料,并对材料电学性能进行分析。结果显示:加入 0.5% 的 GR, PEEK 复合材料的热导率和电导率与未加入石墨烯相比分别增加了 15.5% 和 73.1%。

苏亚男^[32]采用预浸料喷涂法制备了 PEEK/CNTs/CF 多尺度复合材料,并对复合材料力学性能、电学性能以及热学性能进行了测试,当 CNTs 质量含量为 1.0% 时,复合材料 0° 方向、厚度方向的电导率提高幅度高达 131%, 245%; 厚度方向热导率提高幅度达 18.6%。将纳米材料、CF 等导电材料适量引入 PEEK 中后,对复合材料导电性能影响较大。

3 耐摩擦性能改性

针对 PEEK 的耐摩擦性能,研究多使用固体润滑剂改善复合材料的摩擦性能。

姚光督等^[33]通过机械共混、高温模压的方法,制备了不同质量分数的 PTFE 改性的 PEEK 复合材料。结果表明:PTFE 增加时,其干摩擦系数下降,达到约 0.17。

楚婷婷等^[34]将质量分数为 5% 的 PTFE 添加至 PEEK 中可有效降低 PEEK 复合材料的摩擦系数。

蔺新禹^[35]采用火焰喷涂工艺,借助不同基体预热温度和喷枪移动速度,在不锈钢基体上制备 PEEK 涂层,并制备 PEEK/CNTs 复合涂层。工艺参数优化结果表明,PEEK 在喷涂过程中高分子链发生断裂、涂层表面粗糙度变化不大。基体预热温度为 200℃,喷枪移动速度为 300 mm/s 时,PEEK 涂层摩擦系数为 0.446,比磨损率为 $12.3 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

王万成等^[36]研究了 PEEK/CF 复合材料在不同水环境下的摩擦学性能,通过构建专门的试验平台以模拟不同的水环境工况,对比研究 PEEK/CF 复合材料分别在气态、汽态与液态 3 种环境时的摩擦磨损性能。研究表明:在气态、汽态和液态三种状态下,运行时间段内平均摩擦系数为 0.22~0.43, 0.24~0.38, 0.07。从磨损形貌可推断,在气态、气-液混合工况下,PEEK/CF 复合材料表现为严重的黏着磨损,在液态水润滑工况下,材料表现为轻微的磨粒磨损。

曹恒畅^[37]研究了六方氮化硼 (h-BN) 改性 PEEK 摩擦磨损性能。相比于纯 PEEK, h-BN 添加量为 10% 时,小、中、大三种粒径的 h-BN 质量含量比例为 6:2:2 和 2:2:6 两种配比状态下对 PEEK 减磨效果最佳,摩擦系数降低约 35%; 而加入 PTFE 可使材料摩擦系数降低 46%。

万磊等^[38]研究了干摩擦和水润滑条件下对 PEEK/SiC 摩擦系数和耐磨性的影响。结果表明:干摩擦条件下,摩擦系数随时间增加趋于稳定,载荷越大,达到稳定摩擦状态所需时间越短;水润滑条件下,水的存在改善了 PEEK/SiC 的

边界润滑条件,同时水起到冷却作用,因此载荷对摩擦系数的影响不大。

4 耐高温性能及其他性能改性

PEEK 的 T_g 较低,即使是结晶度很高的 PEEK 树脂,其在 200℃ 以上也会发生严重软化,限制了这类树脂材料在较高温度段的使用性能,可以通过材料改性方法来提升 PEEK 的使用温度,以改善其高温段使用性能^[39-41]。

PEEK 是一种热塑性特种工程塑料,可以通过挤出、注塑等方式加工成型,但其 T_g 仅为 143℃,限制了材料的应用。而 PI 的 T_g 高达 300℃ 以上,但其加工较为困难。魏云海^[42]通过 PI 对 PEEK 进行改性,以提高 PEEK 的热变形温度及高温下的力学性能。同时还通过加入 h-BN 改善材料的摩擦性能,满足应用的需求。首先用均聚型 PI 对 PEEK 进行共混改性,系统研究了 PI 添加量对材料的力学性能和热性能的影响,研究结果表明,加入均聚型 PI 后,共混材料在室温下力学性能下降,但高温下拉伸弹性模量增大,材料热变形温度增加。

周兵等^[43]采用熔融共混工艺制备 PEEK/CaCO₃ 复合材料时,加入 SPEEK 作为偶联剂,发现偶联剂的加入,制得的复合材料 T_g 升高而熔点降低,提高了材料的使用温度并使加工温度降低。

朱承双^[44]制备了 PEEK/共聚聚醚醚酮 (CoPEEK)/炭黑共混物,主要目的是通过 CoPEEK 与 PEEK/炭黑共混改性,研究其耐热性能和振动性能。结果表明,纯 PEEK 的热变形温度为 145℃, PEEK/CoPEEK/炭黑共混物的质量配比为 30/70/1 时,其共混物热变形温度达到 265℃,是其它共混物热变形温度中最高的,比纯 PEEK 高 120℃,表明通过 PEEK/炭黑与 CoPEEK 共混改性,可以明显提高 PEEK/CoPEEK/炭黑共混物耐热性。

王运良等^[45]将热塑性 PI 和 PEEK 进行熔融共混加工成型,制备得到 PEEK/PI 复合材料。测试其力学性能,结果表明改性树脂的耐热性优于 PEEK,可以提升 PEEK 的高温使用性能。

5 结语

(1) PEEK 及其复合材料的性能研究和在军事领域的应用仍处在初期阶段,虽然科研人员通过共混、熔融等改性工艺制备得到 PEEK 复合材料,其在力学等诸多性能上得以明显改善,但对其在不同条件下的性能优化机理等均需开展深入探究。

(2) 诸多试验结果证明,通过少量填料的加入,可实现 PEEK 复合材料某一性能的大幅提升,但又会影响到另一性能下降。如何通过合理材料配方的研究使得 PEEK 复合材料综合性能得以共同提高,仍需探讨和研究。

(3) 碳纳米材料、纤维、多种填料共同改性 PEEK 树脂基体时,性能更优。但与此同时,多种因素协同作用下 PEEK 复合材料性能改进机理的研究仍非常重要。随着综合性能共同提升,多功能 PEEK 复合材料的研制和应用前景将越来越广。

(4) PEEK 及其复合材料具有许多优良的热学、力学、电学特性,并且具有很好的生物相容性,在航空、航天、汽车、深海、医疗、电气等领域拥有非常大的应用前景。研究 PEEK 及其复合材料的性质、加工方式以及材料性能的成型预测方法,对其实际应用具有非常重要的现实意义。

参考文献

- [1] 孔凡,等. 塑料科技,2001(3):8-10.
Kong Fan, et al. *Plastics Science and Technology*, 2001(3):8-10.
- [2] Choupin T, et al. *Polym Crystallization*, 2019. DOI:10.1002/pcr2.10086.
- [3] Cortes L Q, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(19). DOI:10.1002/app.43396.
- [4] 毕鸿章. 高科技纤维与应用, 2005, 30(4):49-51.
Bi Hongzhang. *High-tech Fiber and Application*, 2005, 30(4):49-51.
- [5] Li Y W, et al. *New Chemical Materials*, 2009(3):37-40.
- [6] 方良超,等. 合成材料老化与应用, 2019, 48(2):115-118.
Fang Liangchao, et al. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2019, 48(2):115-118.
- [7] Zhou T, et al. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2011, 3(12):4557-4560.
- [8] Li D, et al. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3(2):101-105.
- [9] Yang S Y, et al. *Carbon*, 2011, 49(3):793-803.
- [10] Liu L L, et al. *Chem. Res. Chinese Universities*, 2015, 31(5):878-884.
- [11] 林里,等. 高等学校化学学报, 2018, 39(10):2343-2349.
Lin Li, et al. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2018, 39(10):2343-2349.
- [12] 朱姝,等. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(8):130-143.
Zhu Shu, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(8):130-136.
- [13] 马瑞雪. 碳纳米管 / 蒙脱土增强聚醚醚酮纳米复合材料的制备及性能 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
Ma Ruixue. *Preparation and properties of carbon nanotubes / montmorillonite reinforced poly(ether ether ketone) nanocomposites*[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [14] 魏嘉欣. 多壁碳纳米管 / 聚醚醚酮纳米复合材料的界面改性 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
Wei Jiaxin. *Interfacial modification of multi-walled carbon nanotubes / poly(ether ketone) nanocomposites*[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [15] 张荣伟,等. 一种石墨烯改性 PEEK 复合材料: CN 111154226 A[P]. 2020-05-15.
- [16] 熊孟云. 聚醚醚酮及其碳纤维复合材料的结晶行为调控与强化 [D]. 上海: 东华大学, 2019.
Xiong Mengyun. *Regulation of crystallization behaviors and the strengthening and toughening for peek and CF/PEEK composites*[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [17] 张凤,等. 复合材料科学与工程 2021(8):112-119.
Zhang Feng, et al. *Composites Science and Engineering*, 2021(8):112-119.
- [18] 刘芳芳,等. 纤维复合材料, 2020(3):79-82.
Liu Fangfang, et al. *Fiber Composites*, 2020(3):79-82.
- [19] 王家锋,等. 复合材料学报, 2020, 38(8):2625-2634.
Wang Jiafeng, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(8):2625-2634.
- [20] 张森,等. 一种耐压性能好的聚醚醚酮薄壁管: CN 211105981 U[P]. 2020-07-28.
Zhang Sen, et al. *A thin-walled polyetherketone tube with good pressure resistance*: CN 211105981 U[P]. 2020-07-28.
- [21] 孙一剑,等. 高科技纤维与应用, 2021(2):21-27.
Sun Yijian, et al. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2021, 46(2):21-27.
- [22] 申维新,等. 复合材料学报, 2021, 38(6):1809-1816.
Shen Weixin, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(6):1809-1816.
- [23] 扶肖肖,等. 工程塑料应用, 2020, 48(2):1-6.
Fu Xiaoxiao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(2):1-6.
- [24] 吴同华,等. 高等学校化学学报, 2021, 42(8):2627-2634.
Wu Tonghua, et al. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2021, 42(8):2627-2634.
- [25] 王园园,等. 工程塑料应用, 2016, 44(6):32-35.
Wang Yuanyuan, et al. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(6):32-35.
- [26] 詹茂盛,等. 聚醚醚酮 / 多壁碳纳米管导电一复合材料的温-阻和时-阻特性 [C]//2008 年全国高分子材料科学与工程研讨会, 贵阳: 2008.
Zhan Maosheng, et al. *The resistivity-temperature and resistivity-time properties of PEEK/MWNT conductive composites*[C]//2008 National Symposium on Polymer Materials Science, Guiyang: 2008.
- [27] 闫文娟,等. 航空材料学报, 2008, 28(5):83-88.
Yan Wenjuan, et al. *Journal of Aeronautical Materials*, 2008, 28(5):83-88.
- [28] 陈北明. 聚醚醚酮 / 碳纳米管复合材料的制备及其导电性的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
Chen Beiming. *Study on the preparation of PEEK/CNT composite and its electrical conductivity*[D]. Tianjin: Tianjin University,

- 2007.
- [29] 王彧宣. 中国化工贸易, 2015, 26(7):289-290.
Wang Yuxuan. China Chemical Trade, 2015, 26(7):289-290.
- [30] 唐明静, 等. 塑料工业, 2009, 37(4):53-56.
Tang Mingjing, et al. China Plastics Industry, 2009, 37(4):53-56.
- [31] 苏亚男, 等. 新型炭材料, 2017, 32(2):152-159.
Su Yanan, et al. New Carbon Materials, 2017, 32(2):152-159.
- [32] 苏亚男. 碳纳米材料 / 碳纤维 / 聚醚醚酮多尺度复合材料的制备及性能研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
Su Yanan. Study on the preparation and properties of carbon nanomaterials/carbon fiber/Poly(ether ether ketone)multiscale composites[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [33] 姚光督, 等. 材料科学与工艺, 2018, 26(3):59-65.
Yao Guangdu, et al. Materials Science and Technology, 2018, 26(3):59-65.
- [34] 楚婷婷, 等. 轴承, 2015(5):35-37.
Chu Tingting, et al. Bearing, 2015(5):35-37.
- [35] 蔺新禹. 材料保护, 2019, 52(9):18-24.
Lin Xinyu. Materials Protection, 2019, 52(9):18-24.
- [36] 王万成, 等. 润滑与密封, 2019, 44(3):111-116.
Wang Wancheng, et al. Lubrication Engineering, 2019, 44(3):111-116.
- [37] 曹恒畅. 六方氮化硼改善 PEEK 摩擦磨损性能的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- Cao Hengchang. Study on friction and wear properties of poly(ether ether ketone)with h-boron nitride[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [38] 万磊, 等. 轴承, 2020(5):22-26.
Wan Lei, et al. Bearing, 2020(5):22-26.
- [39] Zhao B, et al. Chem.C, 2020, 8(22):7401-7410.
- [40] Dassan E G B, et al. Nanotechnology Rev, 2020, 9(1):768-788.
- [41] Bijwe J, et al. Wear, 2005(10):1536-1542.
- [42] 魏云海. 聚酰亚胺改性聚醚醚酮的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2019.
Wei Yunhai. Study on polyimide modified polyetheretherketone[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [43] 周兵, 等. 高等学校化学学报, 2004, 25(7):1355-1358.
Zhou Bing, et al. Chemical Journal of Chinese Universities, 2004, 25(7):1355-1358.
- [44] 朱承双. 聚醚醚酮材料的改性研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
Zhu Chengshuang. Study the modification of PEEK material[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [45] 王运良, 等. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2013, 30(3):402-405.
Wang Yunliang, et al. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2013, 30(3):402-405.
-
- (上接第 168 页)
- [30] Lin C H, et al. Polymers, 2020, 12(11):2510-2519.
- [31] Hamid A G, et al. Materials Chemistry and Physics, 2019, 237. DOI:10.1016/j.matchemphys.2019.121850.
- [32] Shen Zhiqiang, et al. High Performance Polymers, 2020, 32(10):1122-1130.
- [33] Selvi M, et al. Polymer Bulletin, 2019, 76(7):3785-3801.
- [34] 王鑫. 苯并噁嗪树脂及其碳纤维复合材料增韧改性的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Wang Xin. Study on toughening of benzoxazine resins and their carbon fiber composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [35] Govindraj L, et al. Journal of Polymers and the Environment, 2020, 28(3):918-933.
- [36] Yang J, et al. Journal of Adhesion Science and Technology, 2019, 33(18):1974-1988.
- [37] Zhu Linlin, et al. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2020, 28(7):551-560.
- [38] Sirawit W, et al. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(55):30898-30910.
- [39] Phattarin M, et al. Macromolecular Chemistry and Physics, 2019. DOI:10.1002/macp.201800328.